

屋内高速無線通信システムの研究

梶原 昭博 茨城大学工学部教授

あらまし

ミリ波帯を用いた室内高速無線通信では人間や什器などの障害物によってアクセスポイント（AP）と端末間の直接伝送路が遮断され（シャドーイング）、スループットや遅延特性が大きく劣化する。特に人間の出入りが激しい室内環境下では直接伝送路が頻繁に遮断され、常に安定した伝送路を確保することが難しいと考えられる。これまでシャドーイングに対してはセクタアンテナを用いて壁からの反射伝送路に回線を切り替える方法等が提案されているが、その減衰が比較的大きく、常に安定した伝送路を期待できない。そこで本研究では室内のコーナまたは天井に金属板リフレクタ（数十 $\text{cm}^2 \sim 1 \text{m}^2$ 程度金属板）を設置し、直接伝送路が遮断された場合にはこのリフレクタを介した反射伝送路を選択するパスダイバーシティを提案し、その実現性について検討した。但し、この場合ではマルチパスフェーディングが発生することもあると考えられるのでこれを避けるために円偏波を用いている。

1 まえがき

本研究では屋内での人間等による直接伝送路の遮断によって発生する通信特性の劣化を軽減するためにリフレクタを用いた円偏波ダイバーシティを提案し、その有効性について検討している[1]。

近年、ブロードバンド通信を実現するために準ミリ波（20～30GHz）またはミリ波帯（30～300GHz）を用いた直接伝送路による室内無線通信の研究が活発に行われている[2]。しかしながらこのような周波数帯では準マイクロ波帯と異なり、人間や什器などの障害物によって直接伝送路が遮断（シャドーイング）されるとスループットや遅延特性が大きく劣化することが考えられる。特に人の出入りが激しい室内環境下では頻繁に直接伝送路が遮断されるために、常に安定した伝送路を確保することが難しいことが予想される。そこで端末から送信された信号を複数のアクセスポイント（AP）で同時に受信し、シャドーイングの確率を物理的に軽減するサイトダイバーシティが提案されている[3]。しかしながら複数のAPの設置が必要となるためシステムも複雑になる。またセクタアンテナを用いて壁などからの反射伝送路に回線を切り替える方法も提案されているがその反射による減衰は比較的大きく、常に安定した伝送路を期待できないと予想される[4]。一方、伝送速度を高くする（ブロードバンド）とマルチパスによる信号波形歪み（遅延スプレッド）のため受信特性が劣化する。そこでこの対応策としてスペクトル拡散/CDMAや波形等化技術を用いることも考えられるが[4]、50Mbps以上のブロードバンドになると信号処理速度やシステム等が複雑になるため、適用は難しいと考えられる。また円偏波によるマルチパス抑圧法も提案されている[5][6][7][8]。この方法は従来のような直線（水平または垂直）偏波と違い、壁などからの一回反射波と直接波が直交するために直接波伝送に適用するとマルチパスで最も支配的な一回反射波を抑圧できる[5]。更にアンテナの偏波だけで対応できるために有効な方法の一つと考えられる。

本研究では室内におけるブロードバンド通信を実現するためにリフレクタを用いた円偏波ダイバーシティを提案している。室内にリフレクタを設置することによって直接伝送路だけでなく、リフレクタによる安定した反射伝送路も期待できる[9][10]。また円偏波を用いるために直接波とリフレクタからの反射波は直交（右廻りと左廻り偏波）するためにそれらの干渉による影響はかなり軽減されることが期待できる。更に受信機ではアンテナへ入力される二つの偏波信号から安定した信号を選択することができる（選択性ダイバーシティ）[11]。このため、直接伝送路が遮断されてもリフレクタからの反射波に切り替えることによって劣化率（Outage）を改善することができる。但し、この特性についてはリフレクタのサイズや形状、数に大きく依存すると予想される。そこで本研究では基本的特性を調べるために什器等がない室内でそのコーナに金属板リフレクタ（数十 $\text{cm}^2 \sim 1 \text{m}^2$ の大きさ）を設置した簡単なモデルを仮定している。ここでは壁からの反射波と直接波を利用した従来の選択性ダイバーシティと比較・検討している。

2章では円偏波伝送方式について述べ、4章ではリフレクタを用いた集中型室内無線ネットワークと分散型のAd-hoc室内無線ネットワークを提案し、3次元（3D）レイトラッキングシミュレーションによってその特性を解析している。

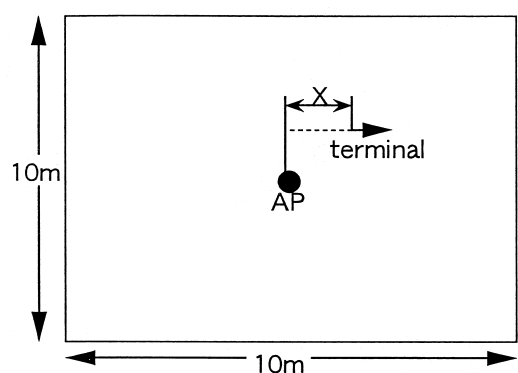
2 円偏波伝送方式

従来の移動体通信では殆どが垂直偏波が用いられている。これは垂直偏波の伝搬特性が優れているのではなく、単にその無指向性アンテナが比較的製作し易いという観点から用いられている。一方、円偏波信号は垂直と水平直接偏波から合成され、それらの信号の位相が90度進んでいるか遅れているかによって偏波面は右廻りまたは左廻り円偏波になる。この円偏波伝送方式の特徴は以下のとおりである。

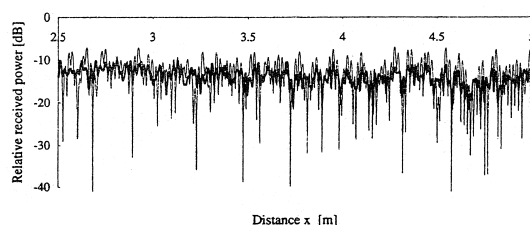
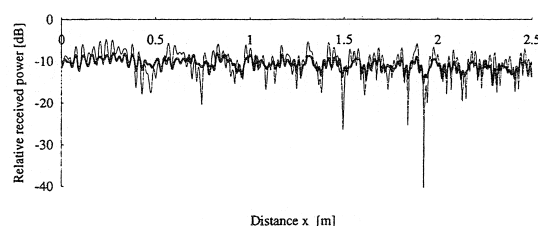
- 1) 右廻りと左廻り円偏波信号は違いに直交する。
- 2) 偏波面の回転方向は反射毎に変化する。

このため直接波伝送では奇数回反射によるマルチパスは受信されないためかなりのマルチパス抑圧効果が期待できる。このため直接伝送を基本とするような室内通信ではマルチパスフェーディングを引き起こす最も支配的な1回反射波が抑圧される。但し、入射角が大きい場合は反射波の偏波面が楕円状になり、その直交性が崩れ、交差偏波成分が発生する。特に交差偏波成分は入射角とともに増加する傾向にある。そこで円偏波による伝送特性について3D-レイトレーシング法を用いて確認する。図1は $10 \times 10 \times 3 \text{ m}^3$ の室内（オープンルーム）における受信信号特性（距離 $x=0 \sim 5 \text{ m}$ ）を表している。但し、AP（または基地局）は天井中央に、また反射面の比誘電率は $\epsilon=10$ と仮定した。これは部屋内の什器や窓等を一切考慮していないために全体的に壁や床の反射面の比誘電率を大きく設定した。但し、細線は垂直偏波を、太線は円偏波を表している。図1からマルチパスフェーディングによって垂直偏波による受信信号は30dBと大きく変動していることがわかる。これは $\epsilon=10$ と大きく、壁などからの反射信号の減衰が少ないためである。しかしながら円偏波伝送を行うことによってマルチパスによるフェーディングは15dB以上も改善していることがわかる。

以上より、円偏波を用いることによってマルチパスフェーディングを大きく改善できることが確認できた。



(a) 室内モデル ($10 \times 10 \times 3 \text{ m}^3$)



(b) 受信信号特性

図1 円偏波を用いた受信信号特性
細線：垂直偏波、太線：円偏波

3 リフレクタを用いた室内通信

3.1 リフレクタによるダイバーシティ技術

集中型ネットワークには図2のように金属板リフレクタを部屋のコーナに設置することによって直接パス（波）だけでなく、複数の反射パスを確保できる。この金属板リフレクタからの反射による損失は低く、その損失はリフレクタの形状やサイズに依存する。ここで送信電力を P_t とするとリフレクタからの受信電力は次式のように表すことができる[12]。

$$P_r = \frac{P_t}{4\pi d_1^2} \cdot \frac{\sigma_R}{4\pi d_2^2} \cdot 10^{\xi/10} \quad (1)$$

ここで d_1 、 d_2 はそれぞれリフレクタからAPおよび端末までの距離、 σ_R はリフレクタのレーダ有効断面積で（リフレクタの法線からの）入射角と反射角の関数である。また ξ は対数正規シャドーイング係数である[13]。

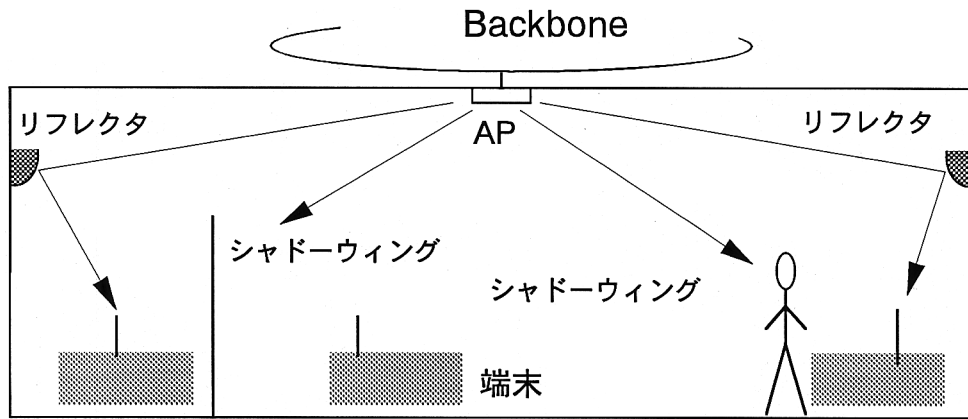


図2 集中型無線ネットワーク
人や什器等によって直接波通信路が遮断されてもリフレクタからの通信路によって通信品質が確保される。

式（1）からリフレクタは次式のような利得を持つパッシブアンテナと考えることができる[12]。

$$G_R = \frac{\sigma_R}{4\pi d_1^2} \quad (2)$$

明らかに式（2）からリフレクタによってサイトダイバーシティと同じ効果が期待できることがわかる。但し、アンテナ利得はリフレクタの有効レーダ断面積に比例し、APまでの距離 d_1 に反比例する。またリフレクタを設置する場合には屋内において不感地帯ができないような工夫が必要だと考えられる。

そこでこのような不感地帯を避けるためにリフレクタのRCS特性（指向性）について検討する。一般にフラットなリフレクタのRCSの指向性は非常に強く、次式のように表される[13]。

$$\sigma_R = \frac{4\pi A^2}{\lambda^2} \left[\frac{\sin(kb \cdot \sin(\theta))}{kb \cdot \sin(\theta)} \right] \cdot \cos^2(\theta) \quad (3)$$

ここで b は金属板の横の長さ、 A はその面積、 k は波数（ $k=2\pi/\lambda$ ）および θ は金属板への入射角（法線方向に対する角度）である。また λ は波長である。

上式からRCSの指向性は金属板の長さに反比例し、またその大きさは面積に比例することがわかる。

このため室内のコーナに設置してもかなりのエリアでリフレクタからのパスを受信できない不感地帯が存在することが考えられる。そこで凸状のリフレクタ板を用いることによってその指向性を広げ、劣化率を改善することができる。本研究では任意の形状のリフレクタのレーダ反射断面積特性を推定する方法としてfacet近似法を用いる[14]。但し、Nyquistの定理よりfacetの大きさは $\lambda/2$ よりも小さくしなければならない[14]。

この推定法の有効性を確認するために電波暗室で金属板のRCS計測を行い、facet近似法による解析結果と比較・検討した。その結果を図3に示す。ここで発振周波数 f_c は94GHz、金属板はフラットでその大きさは $0.3 \times 0.232\text{m}^2$ である。尚、計測で用いた発振器は50mWのガンダイオードを用い、送信機では利得25dBiで垂直偏波のホーンアンテナを用いた。一方、

受信機は11dBiのスロットアンテナを用いた

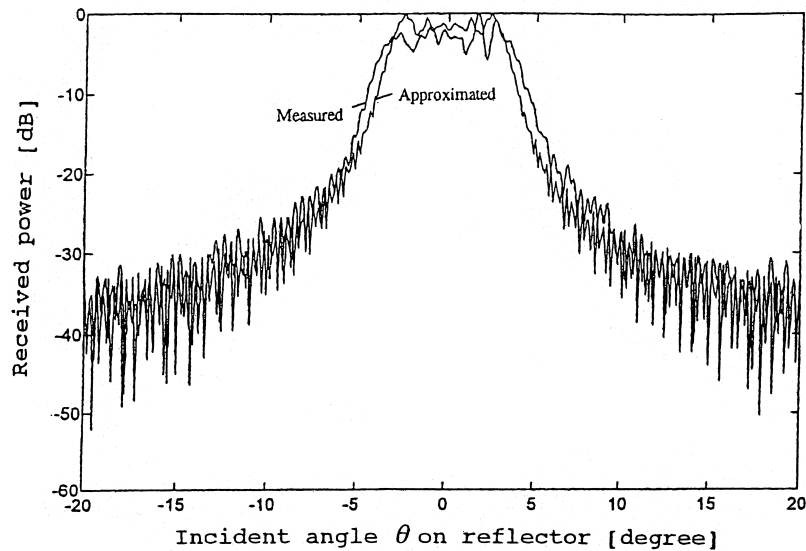
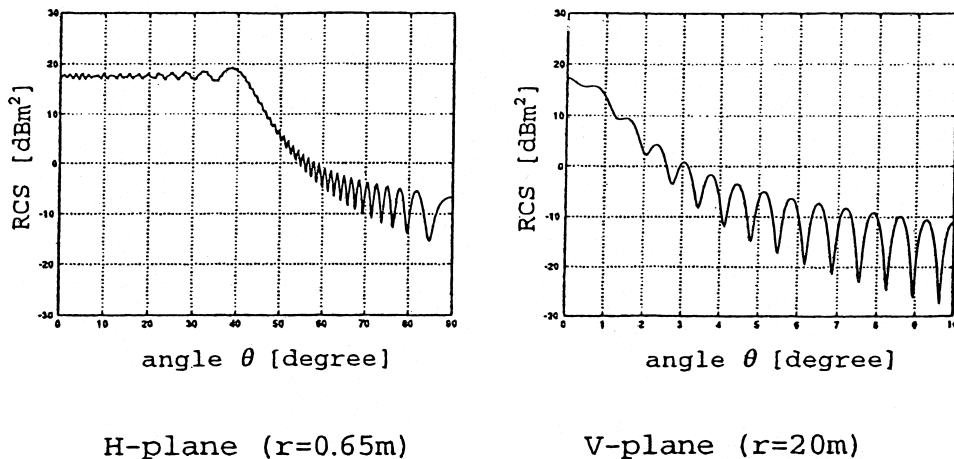


図3 リフレクタのRCS特性 (94GHz)

図3から推定値は計測結果とほぼ一致しており、facet近似法が有効であることがわかる。そこで本研究ではリフレクタのレーダ反射断面積の解析にこのfacet近似法を用いる。

但し、リフレクタのレーダ反射断面積の指向性と利得は相反するため必要以上に指向性を上げると利得が劣化する。また室内のコーナでの設置を考えると水平方向における指向性角度は80～90度が好ましいと考えられる。そこで図4にリフレクタの大きさが $0.5 \times 0.5\text{m}^2$ で、その水平方向および垂直方向での曲率が0.65m、20mの場合のレーダ断面積特性を示す。但し、周波数 f_c は50GHzと仮定する。

図4から直方体状の屋内の殆どのエリアをカバーすることができることがわかる。



H-plane ($r=0.65\text{m}$)

V-plane ($r=20\text{m}$)

図4 凸状リフレクタのRCS特性

大きさは $0.5 \times 0.5\text{m}^2$ 、水平方向および垂直方向での曲率は0.65m、20mである。

3.2 集中型と分散型Ad-hocネットワーク

室内無線ネットワークはAPを介して通信を行う集中型ネットワークとAPを用いないで端末間で自律分散的にネットワークを構成するAd-hocネットワークとに別けることができる。

集中型ネットワークでは図2に示すように部屋のコーナにリフレクタを設置した場合、直接伝送パスとリフレクタからの4つのパスが存在する。このため例え、直接伝送パスや複数のマルチパスが遮断されたとしても受信が可能となると考えられる。

次にAd-hocネットワークでは送・受信機のアンテナの高さが比較的低いため、人間等による直接伝送路が遮断される確率が高くなることが予想される。そこで図5のようにリフレクタを天井に設置することによってその影響を軽減することが考えられる。図5に示すように端末間では横方向での直接パスとリフレクタを介したパスが存在するため、例えば直接パスが障害物によって遮断されてもリフレクタからのパスによって通信が可能である。

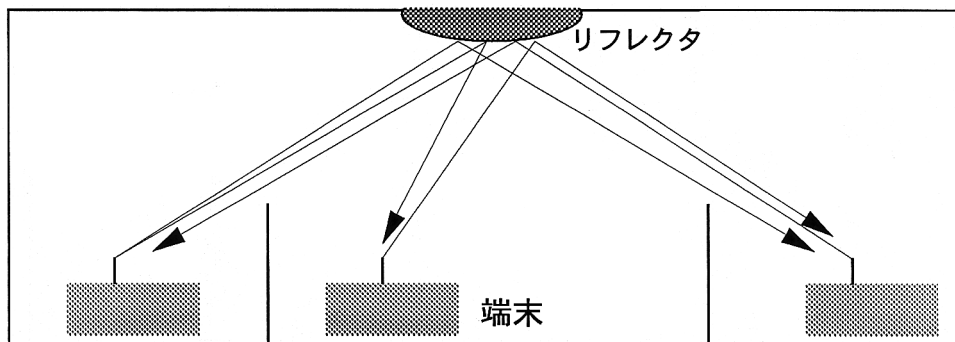


図5 分散型Ad-hocネットワーク
基地局が存在しないpeer-to-peer通信でも天井に設置したリフレクタによって通信品質が確保される。

4 計算機シミュレーション

4.1 シミュレーション条件

リフレクタを用いた円偏波ダイバーシティ特性について3D-レイトレーシング法を用いて解析する[12]。その室内および伝送モデルは下記の通りである。

- (1) 部屋は図6に示すような $10 \times 10 \times 2.5\text{m}^3$ のオープンルームとする。
- (2) 周波数 f_c は50GHzである。このため回折波は考慮されていない。また壁などの反射体の表面はレイリー基準より滑らかであると仮定している。
- (3) 図6のように設置したリフレクタの形状は水平および垂直方向での曲率半径はそれぞれ0.65mおよび20mとする。尚、その有効断面積特性は図4に示している。
- (4) 直接波およびリフレクタからの反射波は独立した対数正規シャドーイングを受ける[15][16]。
- (5) APIは図6に示すように天井中央で、また端末およびリフレクタの高さはそれぞれ60cmおよび2mとする。
- (6) 端末は受信した二つの直交偏波から平均受信電力が大きい信号を選択する（選択性ダイバーシティ）[17]。

4.2 シミュレーション結果

シャドーイング係数が6dBで壁の誘電率 $\epsilon = 3$ における劣化率特性を図7に示す。但し、許容可能な信号対雑音比（SNR）を $R_i = 7\text{dB}$ と仮定している。図7から単一受信（single antenna）と比べて従来の偏波ダイバーシティ方式（P.D）の特性改善は小さいことがわかる。これは壁の誘電率が $\epsilon = 3$ と小さいため壁からの反射波が大きく減衰し、許容SNR以上の反射波を期待することが難しいためである。しかしながら、リフレクタを用いることによって劣化率がかなり改善されることがわかる。またその特性改善はリフレクタのサイズに依存することも予想できる。

次に $\epsilon = 6$ および9と仮定したときの劣化率特性を図8および9に示す。明らかに ϵ が大きくなると壁からの反射波の減衰も小さくなるため従来の偏波ダイバーシティでも利得が得られるが、大きな特性改善を期待することは難しい。一般に室内には様々な什器が設置してあり、それらからの反射波も期待できるかもしれない。しかしながら、例えば、それらの什器が金属でできていたとしてもそれらの表面形状は一般にフラットであるために反射波の指向性が鋭く、その結果不感地帯も広く、大きな特性改善は期待できない。一方、 $L = 1\text{m}$ 程度のリフレクタを用いれば、常に安定した特性が得られることがわかる。例えば、 $L = 1\text{m}$ であれば99%の場所率に対して3～5dBのダイバーシティ利得が得られる。

次にシャドーイングの大きさに対する劣化率特性を図10に示す。図10から劣化率はシャドーイング係数にほぼ比例することがわかる。このため人間の往来が激しいようなオフィスなどでは十分な劣化率を得ることは難しいと思われる。しかしながら図7に示すように $L = 0.7 \sim 1\text{m}$ 程度のリフレクタを用いればそれらのシャドーイングに対しても特性劣化を防ぐことが期待できる。

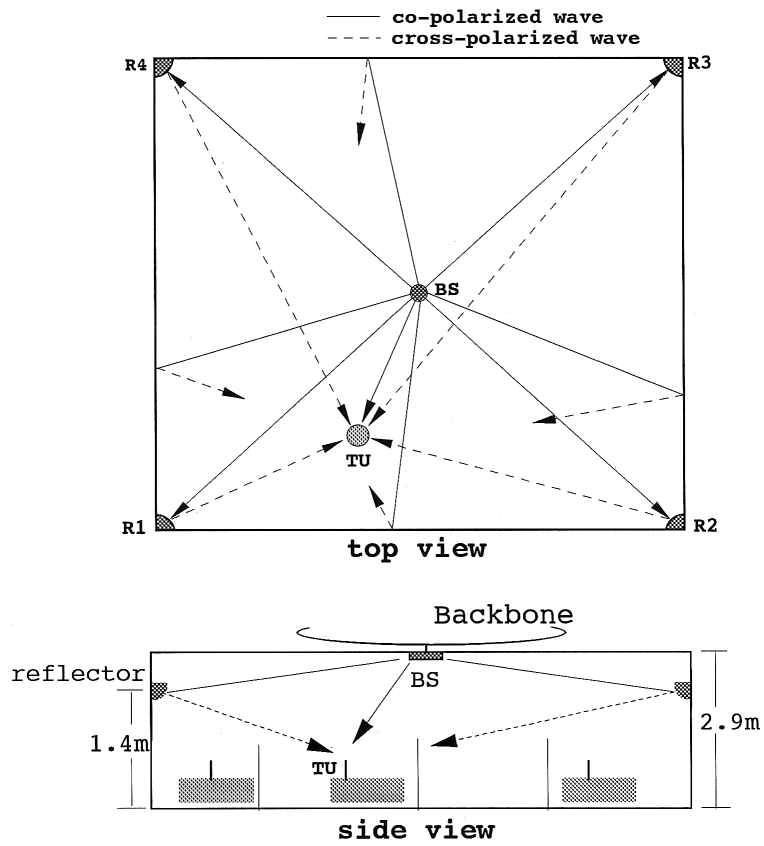


図6 シミュレーションモデル

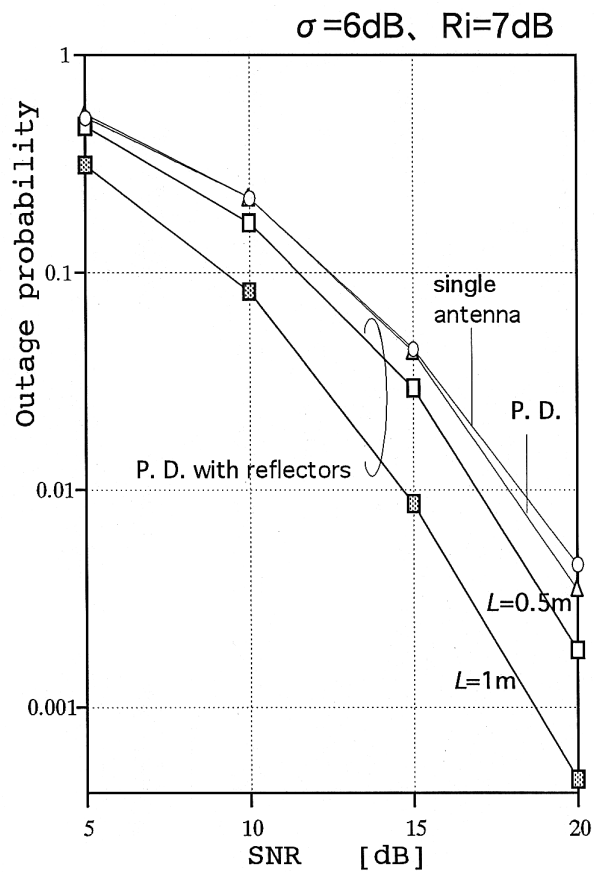


図7 劣化率特性 ($\varepsilon=3$)

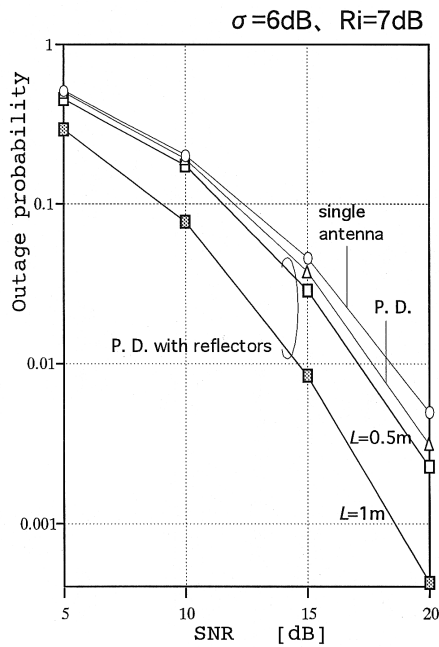


図8 劣化率特性 ($\varepsilon = 6$)

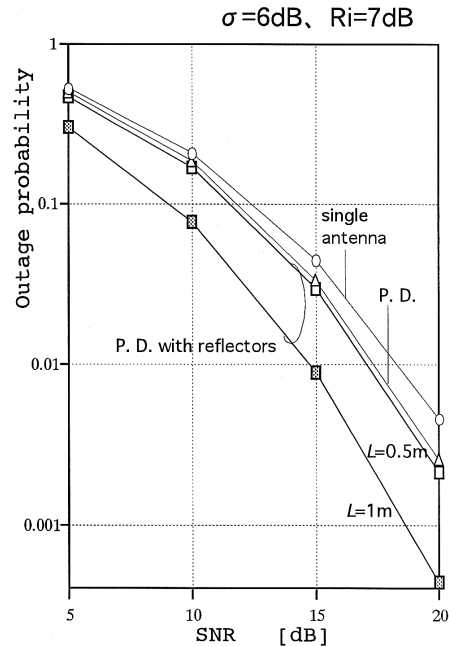


図9 劣化率特性 ($\varepsilon = 9$)

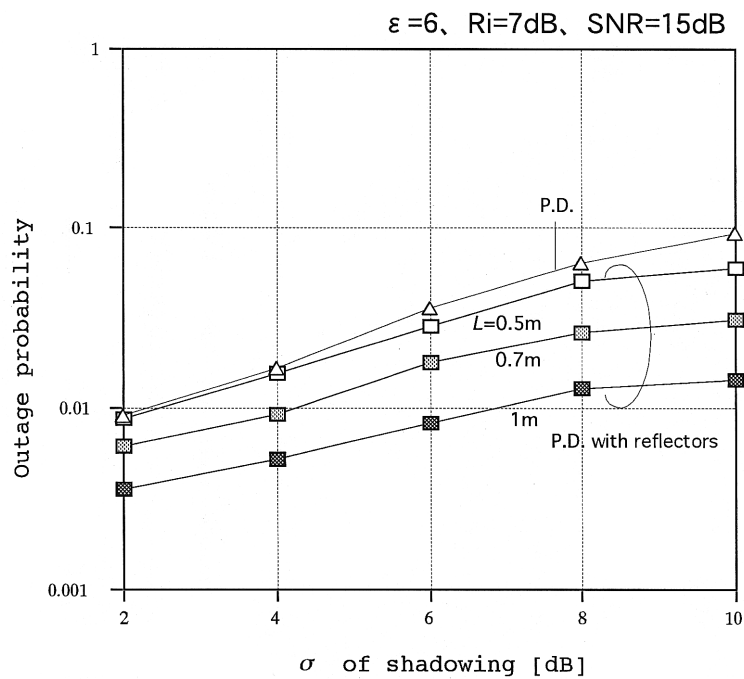


図10 シャドーイングに対する劣化率特性

5 まとめ

屋内高速無線通信における大きな技術課題としてマルチパスフェーディングや人間や障害物によるシャドーイングによる特性劣化が挙げられる。特にオフィスや家庭内では人の往来や障害物によって直接伝送路が遮断されることが多く、それが予想される。特に準ミリ波またはミリ波帯の周波数では回折効果が期待できないために通信が遮断されてしまう。

そこで本研究では室内における無線高速通信を実現するためにリフレクタを用いた円偏波ダイバーシティを提案し、シミュレーションによってその有効性を確認した。その結果、室内にリフレクタを設置することによって直接伝送路だけでなく、リフレクタを介した安定した伝送路が確保できるため、特性を3～5 dB改善できることを確認した。更に円偏波を用いるために直接波とリフレクタからの反射波は直交（右回りと左回り偏波）するためにそれらの干渉による影響はかなり軽減されることが期待できることも確認できた。本研究調査では屋内天井に設置したアクセスポイント（AP）による集

中型ネットワークについて検討したが、APを必要としないAd-hocネットワークでも同様にリフレクタを用いることによってシャドーイングによる特性劣化を避けることが期待できると予想される。

参考文献

- [1] A.Kajiware, "Circular Polarization Diversity with Passive Reflectors in Indoor Radio Channel", *IEEE Trans. on VT*, Vol.49, No.3, May 2000.
- [2] 瀧本、ミリ波利用と応用システムの展望 電学論C、116巻5号、pp.495-498 (平成8年5月)。
- [3] 笹岡秀一、移動通信、オーム社出版局 (平成11年3月)
- [4] D.Buchholz, P.Odlyzko, M.Taylor, R.White, "Wireless In-Building Network Architecture and Protocols", *IEEE Network Magazine*, pp.31-38, Nov 1991.
- [5] A.Kajiware, "On a Circular Polarization Wave Transmission in LOS Indoor Radio Channels", *IEEE Proc. PIMRC94*, A2.6, pp.156-159, Sep. 1994.
- [6] T.Manabe, K.Sato, H.Masuzawa, K.Taira, T.Ihara, Y.Karashima, K.Yamaki, "Polarization Dependence of Multipath Propagation and High-Speed Transmission Characteristics of Indoor Millimeter-Wave Channel at 60GHz", *IEEE Trans. on VT*, Vol.44, No.2, pp.268-273, May 1995.
- [7] A.Kajiware, "Line-of-Sight Indoor Radio Communication Using Circular Polarized Waves", *IEEE Trans. on VT*, Vol.44, No.3, pp.487-493, August 1995.
- [8] 笠原、前山、池上、"屋内伝送における円偏波伝搬特性"、電子情報通信学会進学技報RCS93-94、pp.65-70 (1994-02).
- [9] A.Kajiware, "Indoor Radio Measurement at 94GHz", *Proc. of PIMRC '95*, pp.1026-1030, Sep. 1995.
- [10] A.Kajiware, "Millimeter Wave Indoor Radio Channel with Artificial Reflector", *IEEE Trans. on VT*, Vol.46, pp.486-493, pp.486-493, May 1997.
- [11] A.Kajiware, "Circular Polarization Diversity with Reflector in Indoor Radio Channel", *Proc. of IEEE ICC '97* pp.624-628, June 1997.
- [12] T.S.Rappaport, "Wireless Communications: Principles and Practice", Prentice Hall Inc., 1996.
- [13] N.Currie, "Radar Reflectivity Measurement: Techniques & Applications", Artech House Inc., 1989.
- [14] D.Elking, J.Roedder, D.Car, S.Alsbach, "A Review of High-Frequency Radar Cross Section Analysis Capability at McDonnell Douglas Aerospace", *IEEE Antenna and Propagation Magazine*, Vol.37, No.5, pp.33-43, Oct. 1995.
- [15] W.Lee, "Mobile Communications Engineering", McGraw-Hill, Inc, 1982
- [16] J.Gibson, "The Mobile Communication Handbook", Session 23, pp.370-380, CRC Press Inc., 1996.
- [17] J.Haug, D.Ucci, "Outage Probability of Microcellular Radio Systems in a Rayleigh/Rician Fading Environment", *IEEE Proc. of ICC '92*, pp.306-309, May 1992.
- [18] F.Zavosh, J.Aberle, "Improving the Performance of Microstrip-Patch Antennas", *IEEE Antenna and Propagation Magazine*, Vol.38, No.4, pp.7-12, August 1996.

< 発 表 資 料 >

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Circular Polarization Diversity with Passive Reflectors in Indoor Radio Channels	米国電気電子学会 IEEE Transactions on Vehicular Technology	2000年5月